



**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

**Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki**

**Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych  
Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza**

**mgr inż. Filip PAWLAK**

**WPŁYW DYNAMICZNYCH ODDZIAŁYWAŃ  
RADIACYJNYCH PODŁÓG CHŁODZĄCYCH  
NA ICH CHARAKTERYSTYKI UŻYTKOWE**

**Autoreferat rozprawy doktorskiej**

Promotor: prof. dr hab. inż. Halina KOCZYK

Promotor pomocniczy: dr inż. Andrzej GÓRKA

Poznań, 2022



## Streszczenie rozprawy doktorskiej

Przedmiotem dysertacji jest analiza dynamicznych oddziaływań cieplnych systemów wodnych, radiacyjnych podłóg chłodzących i badanie wpływu dynamiki procesu przepływu ciepła w pomieszczeniach z tymi systemami na ich charakterystyki użytkowe, które w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych mogą znacząco odbiegać od charakterystyk teoretycznych, wyznaczonych w warunkach statycznej wymiany ciepła.

W pracy dokonano krytycznego przeglądu literatury i analizy obecnego stanu wiedzy w zakresie stosowalności i metodyki projektowania systemów wodnych, radiacyjnych podłóg chłodzących oraz przepływu ciepła w pomieszczeniach wyposażonych w tego typu instalacje.

Opracowano autorski model obliczeniowy, umożliwiający analizę dynamicznego przepływu ciepła w pomieszczeniu wyposażonym w chłodzenie podłogowe, ze szczególnym uwzględnieniem niejednorodności cieplnej środowiska wewnętrznego, spowodowanej między innymi przez zmienne w czasie i przestrzeni zyski ciepła od promieniowania słonecznego, oddziałującego na podłogę. Autorski model numeryczny zaimplementowano jako program komputerowy. Zweryfikowano poszczególne moduły obliczeniowe, a cały złożony model zwalidowano za pomocą pełnoskalowych badań eksperymentalnych w komorze doświadczalnej.

Autorski program komputerowy wykorzystano do przeprowadzenia symulacji umożliwiających analizę wpływu oddziaływań radiacyjnych podłóg chłodzących na ich charakterystyki użytkowe, z uwzględnieniem czynników dynamizujących te oddziaływania.

Na podstawie przeprowadzonych analiz sprecyzowano uogólnione wnioski i rekomendacje do projektowania i eksploatacji tego typu systemów.

## Spis treści

Streszczenie rozprawy doktorskiej.....	3
1. Wprowadzenie.....	4
1.1. Metodyka projektowania podłóg chłodzących.....	4
1.2. Sprecyzowanie problemu badawczego.....	6
2. Cel, tezy i zakres rozprawy .....	7
3. Wybór i uzasadnienie metody badawczej .....	8
3.1. Metoda rozwiązania problemu naukowego.....	8
3.2. Narzędzie badawcze (autorski model numeryczny).....	8
4. Badania symulacyjne.....	16
4.1. Skrócony opis badań .....	17
4.2. Przykładowe wyniki .....	19
5. Podsumowanie i wnioski.....	22

## 1. Wprowadzenie

### 1.1. Metodyka projektowania podłóg chłodzących

Coraz bardziej skomplikowana geometria i rosnące wymagania aranżacyjne nowoczesnych budynków narzucają stosowanie coraz bardziej zintegrowanych z budynkiem systemów utrzymania komfortu klimatycznego. Dodatkowo, ze względu na rosnący udział zużycia energii na potrzeby chłodzenia nowoczesnych budynków w ich całkowitych bilansach energetycznych, wybór i konfiguracja systemu chłodzenia pomieszczeń jest jedną z krytycznych decyzji podejmowanych na relatywnie wczesnym etapie projektowania, która wpływa na ich późniejszą energochłonność i komfort użytkowania. Wybrane we wczesnych fazach projektu rozwiązania są trudne do zmiany w miarę postępowania stopnia zaawansowania projektu, a w trakcie realizacji i eksploatacji budynku bardzo trudne lub nawet niemożliwe do korekty.

Podłogi chłodzące należą do płaszczyznowych systemów chłodzenia wbudowanych w warstwy posadzkowe. Obejmują obwody rurowe, rozdzielacze i wyposażenie sterujące. Najpopularniejsze w Polsce są podłogi radiacyjne typu A1, z rurkami hydraulicznymi zatopionymi w posadzkach na warstwie izolacji cieplnej i zalewanymi jastrychem (*technologia mokra*). Obecnie wykorzystanie tego typu systemów do chłodzenia jest znacznie mniej popularne niż analogiczna aplikacja do ogrzewania.

Procedurę projektowania systemów radiacyjnych podłóg chłodzących przedstawia norma *PN-EN ISO 11855-3*. Kluczowe na etapie projektowania tego typu systemów jest wyznaczenie projektowego obciążenia chłodniczego oraz odpowiednia konfiguracja elementów podłogi chłodzącej, w tym warstw posadzkowych i systemu hydraulicznego.

W kontekście metod wyznaczania projektowego obciążenia chłodniczego wskazywanych w metodologii krajowej i europejskiej (np. w normie *PN-EN 16798-9*) i amerykańskiej (np. w normie *ANSI/ASHRAE/ACCA Standard 183-2007 (RA2020)*), należy zauważyć:

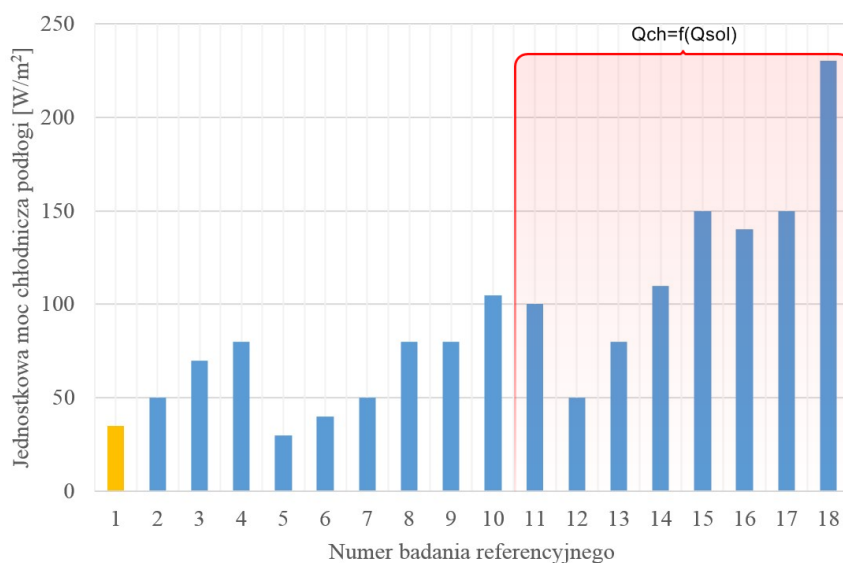
- polepszające się parametry termoizolacyjności przegród budowlanych i rosnące wymagania przepisów dotyczące efektywności energetycznej budynków w Polsce i na świecie sprawiają, że w nowoprojektowanych budynkach energia promieniowania słonecznego docierająca do pomieszczeń przez ich przegrody przezroczyste nabiera coraz większego znaczenia w kontekście ich bilansów energetycznych,
- zalety uwzględniania dynamiki procesu przepływu ciepła i wpływu pojemności cieplnej pomieszczenia na moc systemów chłodzenia są podkreślane we wszystkich współczesnych metodach obliczeniowych,
- współczesne metody obliczeniowe, w tym znormalizowane, ze względu na swoją złożoność narzucają realizowanie obliczeń z wykorzystaniem technik komputerowych,
- metody wyznaczania obciążenia chłodniczego realizowane jako odrębne kroki projektowe i nienawiązujące do rozwiązania technicznego systemu chłodzenia mogą prowadzić do przeszacowania obciążenia chłodniczego wynikającego z nieuwzględnienia oddziaływania jego radiacyjnej części z przegrodami i innymi elementami w pomieszczeniu,
- ze względu na relatywnie długi czas oddziaływania i dużą gęstość strumienia ciepła od promieniowania słonecznego docierającego przez przegrody przezroczyste do powierzchni podłogi w cyklu dobowym sezonu letniego, szczególnie znaczące wydaje się być bezpośrednie oddziaływanie promieniowania słonecznego na powierzchnię podłogi przy jej ewentualnej aktywacji cieplnej (zastosowaniu systemu podłogi chłodzącej).

Dobór i wymiarowanie podłogi chłodzącej polega na ustaleniu jej parametrów:

- konstrukcyjnych (średnica, przebieg rur zatopionych w posadzce i podział na obiegi hydrauliczne, lokalizacja względem pozostałych warstw posadzkowych), które są niemodyfikowalne w późniejszej eksploatacji systemu,
- eksploatacyjnych (określenie projektowej temperatury zasilania i powrotu, temperatury na powierzchni posadzki, natężenia przepływu wody chłodzącej, sposobu sterowania), które mogą ulegać modyfikacjom w trakcie eksploatacji systemu.

Powyższe parametry wpływają na projektową moc chłodniczą podłogi, którą w praktyce inżynierskiej odnosi się do jednostkowej powierzchni posadzki aktywowanej termicznie [W/m<sup>2</sup>]. W Polsce najaktualniejszą normą dotyczącą określania mocy chłodniczej systemu radiacyjnej podłogi chłodzącej jest pięcioczęściowa *PN-EN 1264*, na której podstawie dostawcy systemów stosowanych w tego typu aplikacjach wyznaczają nomogramy doborowe, będące często podstawą do ich projektowania. Należy podkreślić, że projektowanie systemów radiacyjnych podłóg chłodzących w oparciu o tego typu nomogramy nie pozwala na uwzględnienie dynamiki oddziaływań cieplnych w pomieszczeniu, a wyznaczone w ten sposób moce chłodnicze są szacunkowe.

Problem wyznaczania mocy chłodniczej  $Q_{ch}$  radiacyjnych podłóg chłodzących był w ostatnich latach poruszany przez naukowców. Prezentowane w badaniach naukowych charakterystyki użytkowe obejmujące moce chłodnicze systemów radiacyjnych podłóg chłodzących osiągnięte w zależności od ich warunków pracy znacząco odbiegają od określonych w sposób znormalizowany, w szczególności w przypadku występowania oddziaływania promieniowania słonecznego  $Q_{sol}$  na powierzchnię posadzki, co pokazano na poniższym rysunku:



**Źródła danych:**

- 1-materiały techniczne Uponor, wg PN-EN1264 (2012)
- 2-Wu et al. (2015)
- 3-Pawlak (2015)
- 4-Werner-Juszczuk (2019)
- 5-Olesen i Michel (2008)
- 6-Simmonds (1994)
- 7-Zhang et al. (2012, 2013)
- 8-Simmonds et al. (2000), Kessling et al. (2004)
- 9-Wang et al. (2021)
- 10-Karakoyun et al. (2020)
- 11-materiały techniczne Uponor, szacowana (2013)
- 12-Zhao et al. (2022)
- 13-Simmonds et al. (2006)
- 14-Pantelic et al. (2018)
- 15-Olesen (1997)
- 16-Tang et al. (2018)
- 17-Zhao et al. (2014,2015)
- 18-Odyjas i Górka (2013)

**Rys 1:** Jednostkowa moc radiacyjnych podłóg chłodzących wg badań naukowych i studiów przypadków (kolor niebieski) w porównaniu z wynikami obliczeń znormalizowanych (kolor pomarańczowy).

Przytoczone wyniki badań potwierdzają silną zależność mocy podłogi chłodzącej od rodzaju, wielkości i miejsca powstawania obciążeń chłodniczych. Precyzyjne powiązanie projektowej mocy radiacyjnej podłogi chłodzącej z obciążeniami chłodniczymi wymaga stosowania na etapie projektowania złożonych metod obliczeniowych, uwzględniających dynamikę oddziaływań cieplnych.

## 1.2. Sprecyzowanie problemu badawczego

Dynamika powstawania zysków ciepła w pomieszczeniach i interakcja pojemności cieplnej budynku z tymi zyskami, a także znaczny wpływ rodzaju zysków ciepła na obciążenie chłodnicze jest powszechnie znanym problemem inżynierskim, który jest w różnym stopniu szczegółowości uwzględniany w procesie projektowym instalacji chłodzenia komfortu. Rzadziej natomiast uwzględnia się dynamikę zachodzących w pomieszczeniu procesów cieplnych na potrzeby wymiarowania samych systemów chłodzących, w szczególności określania ich rzeczywistych charakterystyk użytkowych, zależnych od tych nieuniknionych, dynamicznych oddziaływań ze środowiskiem, w którym są zainstalowane. Ze względu na mnogość możliwych rozwiązań konstrukcyjnych, dostępnych konfiguracji operacyjnych oraz strategii sterowania systemami radiacyjnych podłóg chłodzących, które w interakcji ze zmiennymi w czasie zyskami ciepła determinują ich charakterystyki użytkowe, należy podkreślić potrzebę dalszych badań, mających na celu lepsze poznanie dynamicznych oddziaływań cieplnych zachodzących w pomieszczeniach z tego typu systemami i sprecyzowanie dedykowanych dla nich rekomendacji oraz wytycznych projektowych i eksploatacyjnych.

W przypadku radiacyjnych podłóg chłodzących zachodzi ich specyficzne oddziaływanie z promieniowaniem słonecznym, którego składowa bezpośrednia dociera przez okna bezpośrednio do powierzchni podłogi. Temperatura powierzchni podłogi, w porównaniu z temperaturą pozostałych przegród, ma ponadto w wielu przypadkach największy wpływ na komfort cieplny użytkowników pomieszczenia, m.in. ze względu na stały, bezpośredni kontakt użytkowników z powierzchnią podłogi, najwyższy spośród przegród ograniczających pomieszczenie współczynnik konfiguracji radiacyjnej wymiany ciepła z użytkownikiem i relatywnie duży udział w całkowitej powierzchni wewnętrznej przegród budowlanych pomieszczenia.

Chłodzenie podłogowe jest także najbardziej wymagającym systemem chłodzenia płaszczyznowego w kontekście zabezpieczenia przed wykropleniem pary wodnej na zimnych powierzchniach.

Wykorzystanie uproszczonych technik projektowych i ignorowanie dynamicznych oddziaływań systemów radiacyjnych podłóg chłodzących na etapie ich doboru może prowadzić do znacznego błędu w określeniu charakterystyk użytkowych tych systemów, ich niepoprawnego zwymiarowania, wykroczenia poza warunki komfortowej lub bezpiecznej ze względu na wykraplanie pary wodnej pracy. W skrajnych przypadkach opieranie się w procesie projektowym o charakterystyki statyczne może prowadzić do niesłusznej decyzji o stosowaniu lub niestosowaniu radiacyjnych podłóg chłodzących w danej aplikacji.

**Interesującym problemem naukowym jest badanie zależności charakterystyk użytkowych radiacyjnych podłóg chłodzących od ich dynamicznych oddziaływań cieplnych w pomieszczeniu, w tym w szczególności z promieniowaniem słonecznym. Niezbędne są dalsze badania zależności projektowej mocy chłodniczej systemów radiacyjnych podłóg chłodzących od ich parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w nawiązaniu do zmiennych w czasie i przestrzeni zysków ciepła oraz strategii sterowania układem w taki sposób, aby zapewnić warunki komfortu cieplnego w chłodzonych pomieszczeniach.**

## 2. Cel, tezy i zakres rozprawy

### *Cel badawczy*

Głównym celem pracy jest zbadanie dynamicznych oddziaływań cieplnych, zachodzących pomiędzy systemem radiacyjnej podłogi chłodzącej a niejednorodnym, szybkozmiennym środowiskiem jakim jest pomieszczenie i jego otoczenie, a następnie ocena wpływu tych oddziaływań na charakterystykę użytkową systemu w sposób umożliwiający sformułowanie praktycznych wniosków, możliwych do wykorzystania w procesie projektowym.

Główny cel badawczy pracy został osiągnięty przez realizację następujących zadań częściowych:

- scharakteryzowanie procesu złożonej wymiany ciepła w pomieszczeniu z wbudowanym systemem radiacyjnej podłogi chłodzącej i w jego otoczeniu oraz identyfikacja głównych parametrów projektowych tego typu systemu wpływających na jego charakterystykę, a także metod ich wyznaczania (projektowania),
- stworzenie narzędzia obliczeniowego, pozwalającego na analizę złożonej wymiany ciepła w pomieszczeniu z systemem radiacyjnej podłogi chłodzącej w ujęciu dynamicznym, z wykorzystaniem metod symulacji komputerowych,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych i uzyskanie danych pozwalających na walidację opracowanego narzędzia obliczeniowego,
- zbadanie oddziaływania pomiędzy radiacyjną podłogą chłodzącą a środowiskiem, w którym jest zainstalowana oraz identyfikacja czynników dynamizujących to oddziaływanie i wpływających na charakterystykę użytkową systemu, wraz z kwantyfikacją tego wpływu,
- uogólnienie wniosków i zdefiniowanie wskazówek projektowych i eksploatacyjnych dla tego typu systemów.

### *Tezy rozprawy*

W pracy sformułowano następujące tezy:

1. Rzeczywiste charakterystyki użytkowe systemów radiacyjnych podłóg chłodzących, ze względu na specyficzne, dynamiczne oddziaływania cieplne, mogą znacząco odbiegać od założeń projektowych bazujących na teoretycznych charakterystykach, właściwych dla niewystępujących w rzeczywistości warunków statycznej wymiany ciepła.
2. Przewidywanie dynamicznych oddziaływań systemów radiacyjnych podłóg chłodzących na etapie ich projektowania pozwala na lepszy (w porównaniu z metodami opierającymi się na charakterystykach statycznych) wybór ich parametrów konstrukcyjnych i operacyjnych, a także dobór właściwego algorytmu sterowania ich pracą.
3. Promieniowanie słoneczne jest istotnym czynnikiem dynamizującym wymianę ciepła w pomieszczeniu z radiacyjną podłogą chłodzącą i generującym znaczne zróżnicowanie ich charakterystyk w obszarach nasłonecznionych i nienasłonecznionych.
4. Radiacyjne podłogi chłodzące wspomagane systemem wentylacyjnym mogą być skutecznym systemem chłodzenia pomieszczeń o znacznym obciążeniu chłodniczym.

### 3. Wybór i uzasadnienie metody badawczej

#### 3.1. Metoda rozwiązania problemu naukowego

Oddziaływania cieplne w pomieszczeniu z radiacyjną podłogą chłodzącą i w jego otoczeniu (na które składa się przepływ ciepła na drodze promieniowania długofalowego i słonecznego, konwekcja na powierzchniach przegród budowlanych, przewodzenie ciepła w warstwach przegród budowlanych, wymiana ciepła i masy powietrza wentylacyjnego oraz czynnika obiegowego w instalacji hydraulicznej) zachodzą w warunkach dynamicznych. Dynamika tych oddziaływań jest spowodowana m.in. zmiennością warunków cieplnych otoczenia pomieszczenia, zmiennością ilościową i jakościową zewnętrznymi i wewnętrznymi zysków ciepła w pomieszczeniu oraz charakterystyką pracy samej podłogi chłodzącej.

Do badań wpływu dynamicznych oddziaływań radiacyjnych podłóg chłodzących na ich charakterystyki użytkowe wybrano metodę modelowania matematycznego z wykorzystaniem symulacji komputerowych, która, pod warunkiem zastosowania modelu obliczeniowego adekwatnego dla badanego zagadnienia (uwzględniającego wymienione wyżej czynniki wpływające istotnie na proces wymiany ciepła), pozwala zarówno na analizowanie wpływu wyizolowanych wymuszeń na dynamiczne odpowiedzi układu, jak i na badanie charakterystyk użytkowych w warunkach odpowiadających rzeczywistej eksploatacji.

#### 3.2. Narzędzie badawcze (autorski model numeryczny)

Do rozwiązania problemu matematycznego wybrano metodę numeryczną różnic skończonych w schemacie jawnym (otwartym, „*explicit*”), w którym wartość funkcji w kolejnym kroku czasowym określana jest na podstawie wartości z kroku czasowego poprzedzającego (metoda *jednokrokowa*). Do realizacji obliczeń z wykorzystaniem tej metody wymagana jest dyskretyzacja czasu oraz przestrzeni. Zaletą tej metody jest relatywnie łatwa implementacja w przypadku prostych geometrii i możliwa do osiągnięcia szybkość obliczeń, w tym prowadzenie obliczeń wielowątkowych (współbieżnych), polegające na równoczesnej realizacji wielu obliczeń zgodnie z możliwościami nowoczesnych procesorów komputerowych i współczesnych możliwości programistycznych. Autorski model numeryczny zaimplementowano jako program komputerowy. Jako narzędzie do jego zaprogramowania wybrano język programowania C++.

Autorski program jest odpowiednim narzędziem do badań zróżnicowanych układów z radiacyjnymi podłogami chłodzącymi, zapewniając następującą funkcjonalność użytkową:

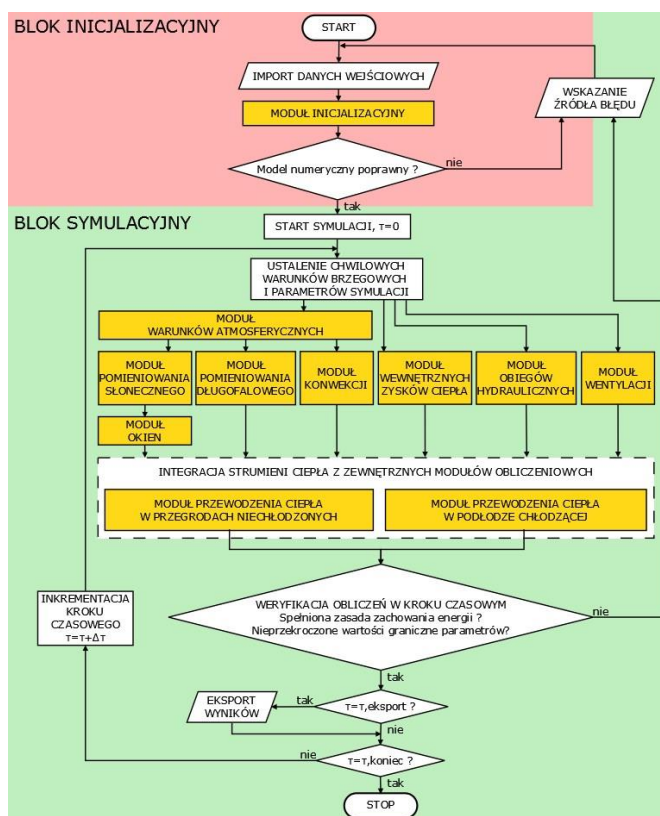
- umożliwienie analiz dla prostopadłościennego pomieszczenia o definiowalnych przez użytkownika wymiarach, dowolnej lokalizacji geograficznej i dowolnej orientacji względem kierunków świata,
- modyfikowalne właściwości przegród budowlanych (liczba i grubości warstw budowlanych, parametry cieplne materiałów, rodzaj środowiska po zewnętrznej stronie tych przegród – wewnętrznych lub zewnętrznych), w tym okien (liczba, lokalizacja w przegrodach, parametry energetyczne),
- możliwość modyfikacji dyskretyzacji przestrzennej przegród pomieszczenia (gęstości siatki przestrzennej),
- modyfikowalne parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne układu radiacyjnej podłogi chłodzącej (w tym liczba obiegów hydraulicznych i ich geometria),
- dowolny zakres czasowy symulacji i definiowalny krok czasowy,



- sparametryzowane i możliwe do modyfikacji profile użytkownika pomieszczenia ze względu na występujące w nim wewnętrzne zyski ciepła (wielkość, czas występowania i lokalizacja w cyklach dobowych i tygodniowych),
- kompatybilność z typowymi danymi meteorologicznymi w układzie godzinowym,
- możliwość kontroli kluczowych parametrów symulacji w każdym kroku czasowym,
- stosowanie metod obliczeniowych bazujących na łatwo dostępnych i definiowalnych danych wejściowych, umożliwiających wykorzystanie opracowanego modelu w praktycznych zastosowaniach inżynierskich,
- interakcja użytkownika z modelem niewymagająca wiedzy programistycznej (wprowadzanie danych wejściowych z plików tekstowych).

Model numeryczny do realizacji badań pozwalających na osiągnięcie postawionego celu badawczego musi uwzględniać złożoną wymianę ciepła w pomieszczeniu z radiacyjną podłogą chłodzącą i w jego otoczeniu, przez co składa się z wielu modułów obliczeniowych, reprezentujących poszczególne mechanizmy wymiany ciepła. Moduły opisujące przewodzenie ciepła w przegrodach budowlanych są elementami integrującymi model jako całość, do których wprowadzane są wyniki obliczeń realizowanych przez inne moduły obliczeniowe, opisujące pozostałe formy przepływu ciepła w pomieszczeniu z podłogą chłodzącą.

Autorski model numeryczny zrealizowano z podziałem na moduły funkcjonalne pogrupowane w 2 bloki obliczeniowe, realizujące symulację zgodnie z poniższą specyfikacją:



Rys 2: Schemat blokowy realizowanego algorytmu obliczeń.

- blok inicjalizacyjny, realizowany jednorazowo i spełniający następujące funkcje:
  - import danych wejściowych,
  - automatyczna budowa modelu numerycznego i ustrukturyzowanie danych,
  - sprawdzenie poprawności wygenerowanego modelu numerycznego,
  - wyznaczenie stanu początkowego modelu (zadanie warunku początkowego jednoznaczności rozwiązania),
- blok symulacyjny, uruchamiany iteracyjnie dla każdego kroku czasowego, spełniający funkcje:
  - ustalenie chwilowych warunków brzegowych i parametrów symulacji w każdym kroku czasowym,
  - wyznaczenie strumieni ciepła przepływających w pomieszczeniu i w jego otoczeniu – poprzez wyodrębnione moduły obliczeniowe modelu,
  - weryfikacja obliczeń poszczególnych modułów,
  - integracja wyznaczonych strumieni ciepła do modułów nieustalonego przewodzenia ciepła,

- o obliczenie chwilowego pola temperatury dla przegród pomieszczenia – symulacja przewodzenia ciepła w podłodze chłodzącej i pozostałych, niechłodzonych przegrodach budowlanych,
- o eksport wyników symulacji do plików zewnętrznych.

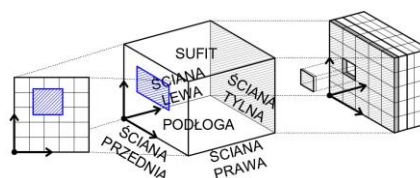
Podstawowe założenia oraz wybrane metody obliczeniowe dotyczące opracowanego narzędzia badawczego wyszczególniono poniżej.

### Inicjalizacja obliczeń numerycznych

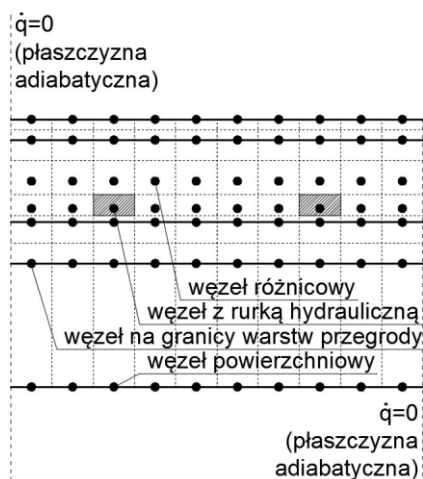
Ze względu na możliwość modyfikacji w opracowanym modelu wielu parametrów symulacji, w tym warunków geometrycznych i fizycznych, na początku symulacji realizowane są procedury przygotowawcze polegające na zbudowaniu modelu numerycznego na bazie wybranych danych wejściowych (geometrycznych, fizycznych i warunków brzegowych, dotyczących pomieszczenia, układu hydraulicznego i otoczenia – lokalizacji pomieszczenia).

Procedury te obejmują:

- dyskretyzację przestrzenną pomieszczenia i jego przegród,
- ustalenie współrzędnych poszczególnych węzłów obliczeniowych w kartezjańskim, trójwymiarowym układzie współrzędnych w nawiązaniu do wybranej lokalizacji geograficznej i obrotu pomieszczenia względem stron świata,
- ustalenie materiałów i układu warstw w głąb poszczególnych przegród budowlanych wraz z krokiem siatki dyskretyzacyjnej poszczególnych warstw w kierunku prostopadłym do powierzchni przegrody,
- kwalifikację węzłów różnicowych i przyporządkowanie im odpowiednich równań różnicowych,
- dyskretyzację układu hydraulicznego.



Rys 3: Schemat przestrzenny modelu obliczeniowego.

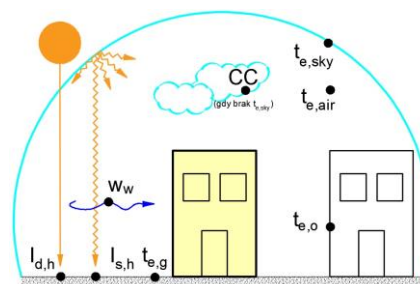


Rys 4: Schemat nakładania siatki dyskretyzacyjnej na przegrody budowlane (przykład dla podłogi z rurkami wodnymi).

### Warunki atmosferyczne

Ilościowa i jakościowa analiza dynamicznych oddziaływań cieplnych zachodzących w pomieszczeniu z radiacyjną podłogą chłodzącą jest możliwa jedynie przy uwzględnieniu zmiennego w czasie stanu termicznego otoczenia modelowanego pomieszczenia - parametrów środowiska zewnętrznego.

Opracowany model obliczeniowy uwzględnia warunki otoczenia obejmujące co najmniej natężenie bezpośredniego ( $I_{d,h}$ ) i rozproszonego ( $I_{s,h}$ ) promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię horyzontalną, prędkość wiatru ( $W_w$ ), temperaturę powietrza ( $t_{e,air}$ ), temperaturę promieniowania nieboskłonu ( $t_{e,sky}$ ), temperaturę gruntu



Rys 5: Parametry klimatu zewnętrznego wykorzystywane w modelu obliczeniowym

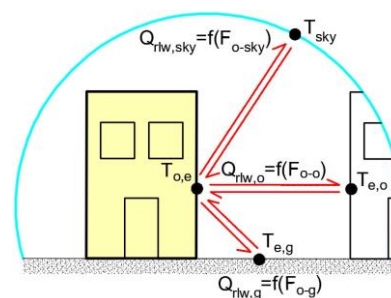
( $t_{e,g}$ ) oraz temperaturę obiektów

w otoczeniu ( $t_{e,o}$ ). Podstawą do obliczeń chwilowych warunków otoczenia zewnętrznego są dane klimatyczne w układzie godzinowym (z godzinowymi krokami czasowymi), z interpolowanymi liniowo wartościami pośrednimi, które są dalej konwertowane dla poszczególnych przegród modelowanego pomieszczenia (np. natężenie promieniowania słonecznego jest przeliczane ze względu na orientację płaszczyzny, do której dociera).

### Promieniowanie długofalowe

Badanie oddziaływań systemu radiacyjnej podłogi chłodzącej w kontekście całego pomieszczenia wymaga uwzględnienia zróżnicowanej wymiany ciepła na drodze promieniowania zachodzącej w pomieszczeniu i poza nim.

Do symulacji wymiany ciepła na drodze promieniowania długofalowego wewnątrz zamkniętej przestrzeni pomieszczenia wykorzystano metodę „net-radiation”, w której tworzony jest układ  $N$  równań opisujący radiacyjną wymianę ciepła  $N$  powierzchni promieniujących. Model numeryczny rozwiązuje w każdym kroku czasowym powyższy układ równań liniowych zapisany w formie macierzowej. Do rozwiązywania układu wykorzystano metodę dekompozycji LU. W obliczeniach uwzględniana jest konfiguracja przestrzenna węzłów obliczeniowych składających się na promieniujące powierzchnie przegród budowlanych wewnątrz pomieszczenia, zgodnie z wybraną gęstością siatki dyskretyzacyjnej (współczynniki konfiguracji są obliczane indywidualnie dla powierzchni poszczególnych węzłów) oraz właściwości emisyjne powierzchni promieniujących.

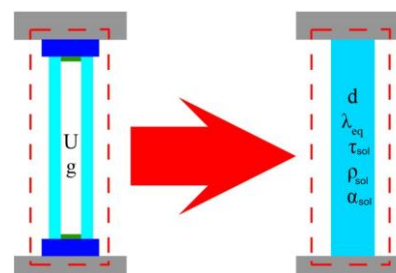


Rys 6: Schemat radiacyjnej wymiany ciepła budynku z otoczeniem.

Obliczenia wymiany ciepła zewnętrznych powierzchni modelowanego budynku (pomieszczenia) na drodze promieniowania długofalowego są realizowane z uwzględnieniem chwilowej i zmiennej w każdym kroku czasowym temperatury obiektów ( $T_{e,o}$ ) i gruntu ( $T_{e,g}$ ) w otoczeniu modelowanego budynku oraz ich właściwości emisyjnych, temperatury powierzchni zewnętrznych przegród modelowanego budynku ( $T_{o,e}$ ), temperatury promieniowania niebosłonu ( $T_{sky}$ ), a także konfiguracji przestrzennej modelowanego budynku względem otoczenia, wyrażanej odpowiednimi współczynnikami konfiguracji.

### Okna

Analizy oddziaływań promieniowania słonecznego na radiacyjne podłogi chłodzące wymagają uwzględnienia istotnego w kontekście transmisji energii promieniowania słonecznego przez przegrody przezroczyste do pomieszczenia wpływu parametrów energetyczno-optycznych przegród przezroczystych, zmiennych w funkcji kąta oddziaływania promieniowania słonecznego na ich powierzchnie, a także rodzaju pakietu szybowego (liczba szyb, występowanie powłok funkcyjnych).



Rys 7: Uproszczony model fizyczny przegrody przezroczystej.

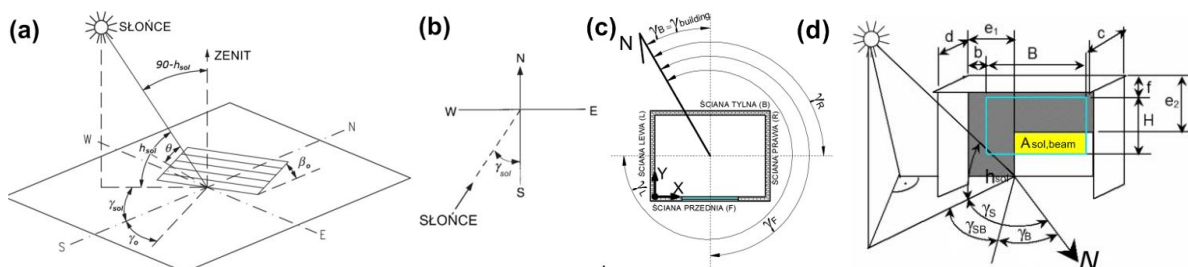
Dla zapewnienia możliwości praktycznego wykorzystania opracowanego modelu numerycznego do zastosowań inżynierskich, do symulacji energetycznej przegród przeszklonych wybrano metodę bazującą na łatwo dostępnych, ogólnych parametrach technicznych okien – ich współczynniku przenikania ciepła  $U$  [ $W/m^2/K$ ] i współczynniku całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego  $g$  [-] i uproszczeniu złożonej geometrii przegrody przezroczystej.

Obliczenia uwzględniają pojemność cieplną okna i przepływ ciepła w oknie na drodze przewodzenia, a także wymianę ciepła z otoczeniem na drodze promieniowania długofalowego i konwekcji po obu stronach okna. Uwzględniono wpływ właściwości energetyczno-optycznych okna, w tym transmisyjności ( $\tau_{sol}$ ), refleksyjności ( $\rho_{sol}$ ) i absorpcyjności ( $\alpha_{sol}$ ) na oddziaływanie promieniowania słonecznego w pomieszczeniu.

### Promieniowanie słoneczne

Promieniowanie słoneczne, jako jeden z głównych czynników dynamizujących przepływ ciepła w pomieszczeniu z radiacyjną podłogą chłodzącą, jest modelowane z uwzględnieniem aspektu energetycznego i geometrycznego zarówno dla zewnętrznych przegród modelowanego pomieszczenia, jak i w jego wnętrzu.

Chwilowa lokalizacja Słońca na nieboskłonie i jego konfiguracja przestrzenna względem modelowanego pomieszczenia jest wyznaczana z wykorzystaniem zasad *trygonometrii sferycznej* i parametrów takich jak deklinacja Słońca ( $\delta_{sol}$ ), kąty godzinne ( $\omega_{sol}$ ), czas słoneczny ( $\tau_{sol}$ ), azymut Słońca ( $\gamma_{sol}$ ) i przegród pomieszczenia ( $\gamma_o$ ), wysokość Słońca ( $h_{sol}$ ), kąt padania promieniowania słonecznego na powierzchnię ( $\Theta$ ).

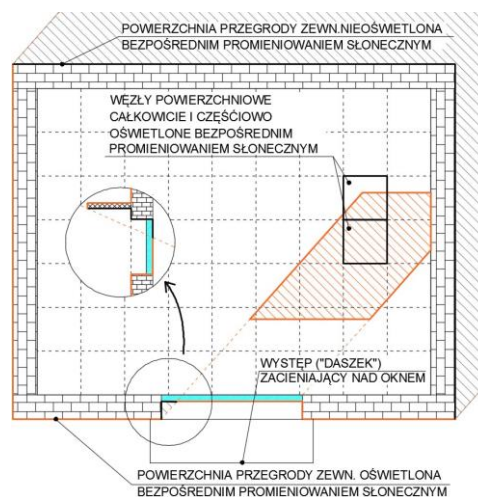


**Rys 8:** Parametry lokalizacyjne Słońca na nieboskłonie względem pomieszczenia. (a) Kąty definiujące lokalizację Słońca względem płaszczyzny nachylonej. (b) Azymut słoneczny na płaszczyźnie horyzontu obserwatora. (c) Azymut budynku i ścian i układ współrzędnych modelu numerycznego. (d) Przykład zacienienia otworu okiennego.

Zastosowano *analityczną* metodę wyznaczania opromieniowanych bezpośrednim promieniowaniem słonecznym powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych przegród budowlanych modelowanego pomieszczenia, polegającą na obliczaniu w trójwymiarowym, kartezyjskim układzie współrzędnych narożników obszarów opromieniowanych indywidualnie dla każdej z przegród modelowanego pomieszczenia/budynku, z uwzględnieniem ewentualnych występow w elewacji ograniczających zasięg oddziaływania bezpośredniego promieniowania słonecznego na powierzchnie okien.

Właściwości energetyczne promieniowania słonecznego są modelowane osobno dla poszczególnych składowych tego promieniowania: *bezpośredniej* – kierunkowej oraz rozproszonej – dyfuzyjnej z nieboskłonu wg modelu izotropowego i odbitej dyfuzyjnie od gruntu.

Właściwości geometryczne promieniowania słonecznego wewnątrz pomieszczenia (powierzchnie obszarów opromieniowanych) są określane przez wprowadzenie *wektora kierunkowego promieniowania słonecznego* i konwersję parametrów kierunkowych promieniowania słonecznego wyrażonych w *geograficznym układzie współrzędnych*

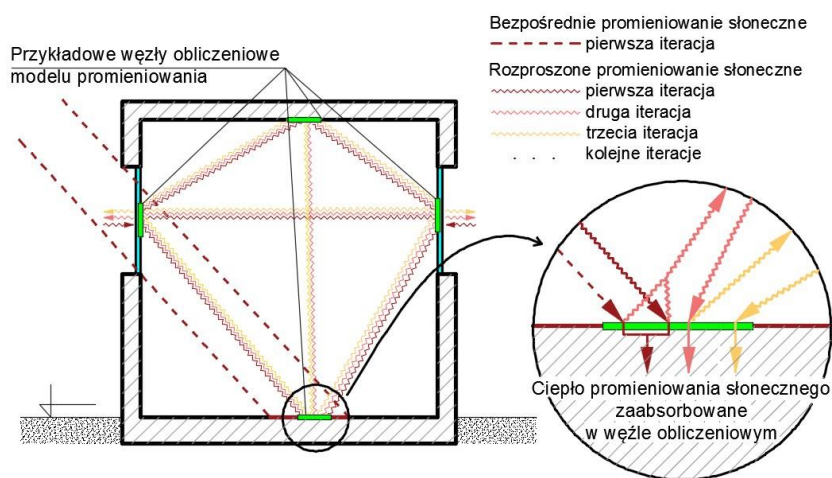


**Rys 9:** Przykładowe oświetlenie węzłów różnicowych powierzchni wewnętrznej podłogi oraz powierzchni zewnętrznych ścian bezpośrednim promieniowaniem słonecznym.



*sferycznych do trójwymiarowego kartezjańskiego układu współrzędnych, a także opis warunków geometrycznych modelowanego pomieszczenia jako płaszczyzn przecinających się w przestrzeni, zgodnie z zasadami geometrii analitycznej, wg których obliczane są także przecięcia wektorów kierunkowych promieniowania z powierzchniami przegród w trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej, co pozwala na wyznaczenie narożników oświetlonych bezpośrednim promieniowaniem słonecznym powierzchni przegród wewnątrz pomieszczenia. Dalej obliczany jest stopień opromieniowania poszczególnych węzłów powierzchniowych w pomieszczeniu bezpośrednią składową promieniowania słonecznego docierającego przez okna – z wykorzystaniem algorytmu całkowitego opartego o metodę trapezów.*

Model obliczeniowy uwzględnia oddziaływanie promieniowania słonecznego na powierzchnie zewnętrzne przegród budowlanych, z wpływem konfiguracji przestrzennej poszczególnych tych przegród względem nieboskłonu, gruntu i obiektów w otoczeniu (np. sąsiednich budynków). W przypadku wnętrza pomieszczenia, strumień ciepła od promieniowania słonecznego przepływający przez przegrodę przezroczystą, jest wprowadzany do pomieszczenia jako składowa bezpośrednia (kierunkowa) i dyfuzyjna (rozproszona z nieboskłonu, odbita od gruntu), które są niezależnie dystrybuowane pomiędzy węzłami różnicowymi modułu obliczeniowego promieniowania, z uwzględnieniem wtórnej transmisji części promieniowania słonecznego z pomieszczenia z powrotem do środowiska zewnętrznego (po trafieniu w okno od strony pomieszczenia i transmisji na zewnątrz). Strumienie ciepła od promieniowania słonecznego są iteracyjnie odbijane od powierzchni przegród wewnętrznych z założeniem utraty kierunkowych właściwości promieniowania bezpośredniego po kontakcie z powierzchniami przegród w pomieszczeniu.



**Rys 10:** Schemat przepływu ciepła od promieniowania słonecznego w pomieszczeniu z uwzględnieniem przykładowych 3 iteracji obliczeń tego promieniowania.

### **Konwekcja, wentylacja i wewnętrzne zyski ciepła**

Powietrze wentylacyjne w pomieszczeniach z radiacyjnymi podłogami chłodzącymi jest istotne nie tylko ze względu na zapewnienie warunków nieprzekraczania punktu rosy, ale także ze względu na jego wpływ na bilans cieplny tych pomieszczeń.

Model numeryczny uwzględnia bilans cieplny powietrza w pomieszczeniu, zależny od wydajności systemu wentylacyjnego i temperatury powietrza nawiewanego, a także konwekcyjnej wymiany ciepła zachodzącej pomiędzy powietrzem a powierzchniami wewnętrznymi przegród.

Do modelowania powietrza w pomieszczeniu zastosowano *model jednowęzłowy - skupiony*, zakładający pełne wymieszanie powietrza w kubaturze pomieszczenia, odpowiedni dla mieszającego systemu wentylacji mechanicznej.

Intensywność konwekcyjnej wymiany ciepła w pomieszczeniu jest obliczana z wykorzystaniem chwilowych współczynników konwekcyjnej wymiany ciepła, wyznaczanych indywidualnie dla poszczególnych węzłów obliczeniowych w zależności od ich rodzaju, orientacji i chwilowego stanu termicznego, a także warunków otoczenia (np. parametrów wentylacji).

Wewnętrzne źródła zysków ciepła wprowadzono do modelu z uwzględnieniem ich mocy rozdzielonej na człon konwekcyjny, wprowadzany do powietrza w pomieszczeniu i radiacyjny, dystrybuowany pomiędzy przegrody ograniczające pomieszczenie z uwzględnieniem ich konfiguracji przestrzennej względem skupionego źródła zysków ciepła.

### Instalacja hydrauliczna podłogi chłodzącej

Możliwość badania wpływu parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych systemu radiacyjnej podłogi chłodzącej na jej charakterystyki użytkowe zrealizowano poprzez zapewnienie swobody symulowania z wykorzystaniem opracowanego programu różnych układów radiacyjnych podłóg chłodzących (dowolnej liczby obiegów hydraulicznych o modyfikowalnych parametrach konstrukcyjnych i operacyjnych). Model obliczeniowy instalacji hydraulicznej umożliwia symulowanie kilku strategii sterowania (regulacja ilościowa on/off, regulacja jakościowa z płynną nastawą temperatury zasilania) oraz uwzględnia inercyjny charakter systemu (pojemność cieplna czynnika obiegowego i szybkość przepływu w rurkach).

Rurki hydrauliczne stanowią w opracowanym modelu obliczeniowym wewnętrzne źródło ciepła dla węzłów różnicowych podłogi, w których są zatopione.

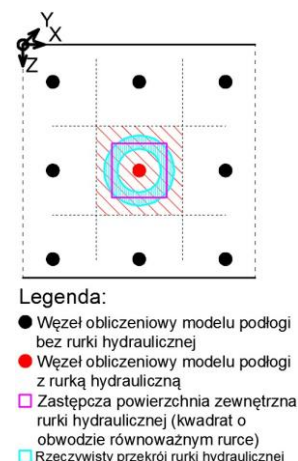
Zaimplementowana metoda obliczeń wymiany ciepła pomiędzy czynnikiem obiegowym w rurkach a warstwami podłogi, w której są zatopione uwzględnia opór przewodzenia ciepła w ściance rurki (z wpływem materiału i grubości ścianki rurki) oraz opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej ścianki rury (z wpływem parametrów fizycznych czynnika obiegowego i rodzaju przepływu).

### Przewodzenie ciepła w przegrodach budowlanych

Do analiz dynamiki procesu przepływu ciepła w pomieszczeniu z podłogą chłodzącą zastosowano *model nieustalonego przepływu ciepła* – zarówno w odniesieniu do przegrody chłodzonej (podłogi), jak i niechłodzonych (ściany, okna, sufit). Problem przewodzenia ciepła w przegrodach budowlanych rozwiązano w *schemacie jawnym*. W modelu przewodzenia ciepła przegród budowlanych uwzględniono chwilowe strumienie ciepła przekazywane do węzłów powierzchniowych tych przegród przez pozostałe moduły obliczeniowe modelu (*promieniowanie długofalowe i słoneczne, konwekcja, wentylacja, wewnętrzne zyski ciepła*).

Ze względu na potencjalnie istotny wpływ geometrycznych aspektów oddziaływania systemu hydraulicznego radiacyjnej podłogi chłodzącej oraz promieniowania słonecznego na zróżnicowany stan termiczny podłogi chłodzącej, zastosowano dla niej *model przewodzenia ciepła przestrzennie trójwymiarowy* (przepływ ciepła w warstwach podłogi we wszystkich kierunkach przyjętego trójwymiarowego, kartezjańskiego układu współrzędnych).

Dla pozostałych, nieaktywowanych cieplnie przegród, zastosowano *model przestrzennie jednowymiarowy* (przewodzenie ciepła jedynie w kierunku prostopadłym do powierzchni przegrody).

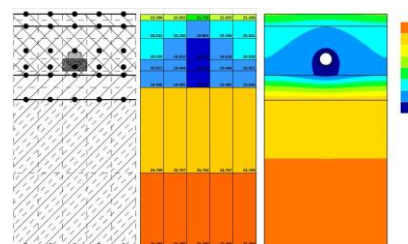


**Rys 11:** Schemat przykładowego powiązania parametrów geometrycznych rurki hydraulicznej z węzłem różnicowym podłogi.

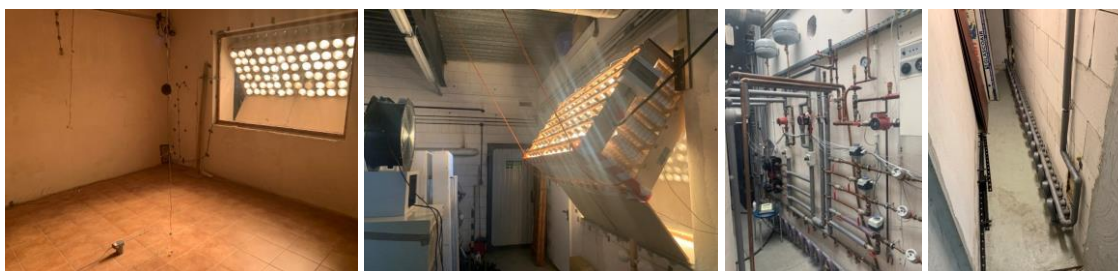
### Weryfikacja i walidacja modelu numerycznego

Poszczególne moduły modelu numerycznego poddano *indywidualnej weryfikacji*, potwierdzając poprawność implementacji poszczególnych procedur obliczeniowych.

Skuteczność całego modelu numerycznego do symulacji dynamicznych oddziaływań radiacyjnych podłóg chłodzących w pomieszczeniach potwierdzono poprzez *walidację doświadczalną*, przeprowadzoną w komorze doświadczalnej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej. W komorze doświadczalnej, wyposażonej m.in. w układ hydrauliczny z rurkami zatopionymi w warstwach posadzkowych, symulator promieniowania słonecznego oddziałującego bezpośrednio na powierzchnię podłogi oraz instalację wentylacyjną (recyrkulacyjną), przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych, których wyniki porównano z wynikami symulacji wykonanych z wykorzystaniem opracowanego programu. W badaniach walidacyjnych model obliczeniowy obejmował 288 węzły różnicowe sufitu,  $2 \times 192 = 384$  węzły różnicowe ściany lewej i prawej,  $2 \times 216 = 432$  węzły różnicowe ściany przedniej i tylnej, 586.800 węzłów różnicowych podłogi, w tym 1.800 węzłów powierzchniowych modułu promieniowania i 45.000 węzłów powierzchniowych modułu przewodzenia i konwekcji.



**Rys 12:** Przykład wyników symulacji weryfikacyjnej dla modułu obliczeniowego instalacji hydraulicznej i przewodzenia ciepła w podłodze wg procedury zgodnej z *PN-EN ISO 11855-2:2015*.



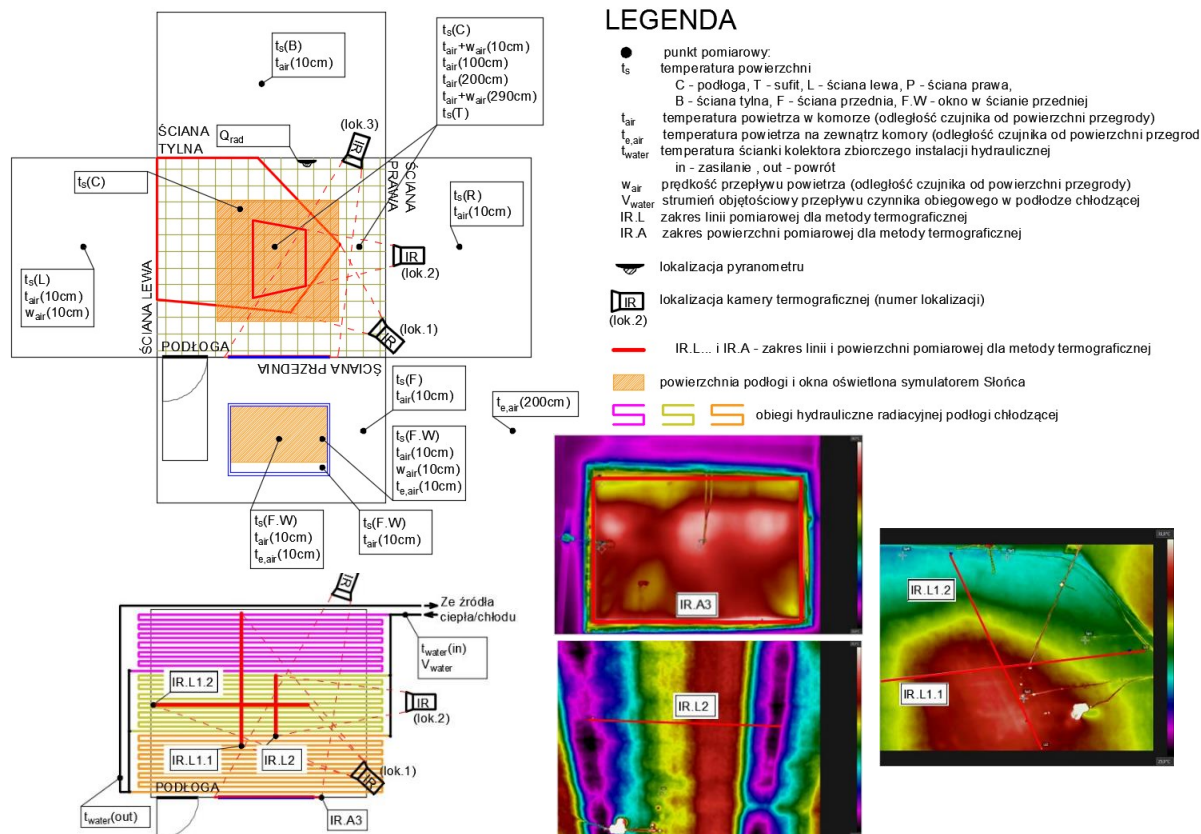
**Rys 13:** Komora doświadczalna do walidacji modelu numerycznego.

Jako kryterium oceny zbieżności wyników symulacji z pomiarami eksperymentalnymi wybrano wartości błędów bezwzględnych ( $\Delta$ ) i względnych ( $\delta$ ) dla krytycznych ze względu na cel badań wielkości, których wartości zmieniają się dynamicznie w typowych warunkach eksploatacji pomieszczenia z podłogą chłodzącą:

- moc chłodnicza (mierzona po stronie czynnika obiegowego pośrednio, przez pomiar jego natężenia przepływu i różnicy temperatury pomiędzy zasilaniem a powrotem),
- średnia temperatura powietrza w pomieszczeniu i temperatura operacyjna, z pomiarem temperatury promieniowania na środku pomieszczenia,
- lokalne wartości temperatury powierzchni przegród budowlanych w pomieszczeniu.

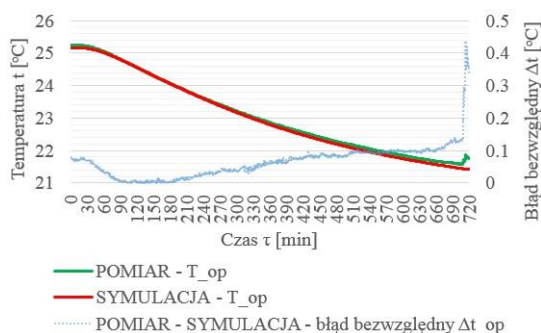
Schemat stanowiska pomiarowego do badań walidacyjnych wraz z lokalizacją głównych punktów pomiarowych, obejmujących pomiary temperatury (czujniki temperatury rezystancyjne i pomiary termograficzne), natężenia przepływu w instalacji hydraulicznej (kryza pomiarowa i przepływomierz ultradźwiękowy), prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniu (termoanemometry), natężenia promieniowania „słonecznego” (pyranometr) pokazano poniżej.



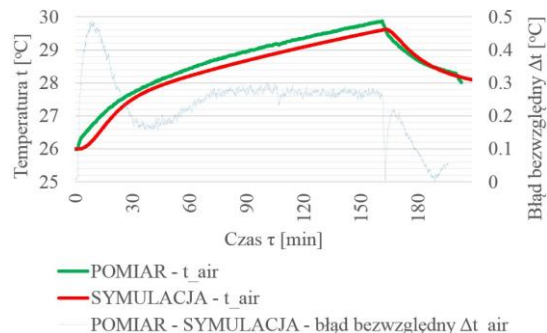


Rys 14: Walidacja doświadczalna modelu - lokalizacja głównych punktów pomiarowych.

Przykładowe wyniki symulacji walidacyjnych pokazano na poniższych rysunkach.



Rys 15: Walidacja doświadczalna modelu (przykład) – porównanie zmierzonej i symulowanej temp. operacyjnej w pomieszczeniu w warunkach oddziaływania chłodzenia podłogowego.



Rys 16: Walidacja doświadczalna modelu (przykład) – porównanie zmierzonej i symulowanej temp. powietrza w pomieszczeniu w warunkach oddziaływania promieniowania słonecznego.

Przeprowadzona procedura walidacyjna potwierdziła zbieżność wyników symulacji z pomiarami badań eksperymentalnych:

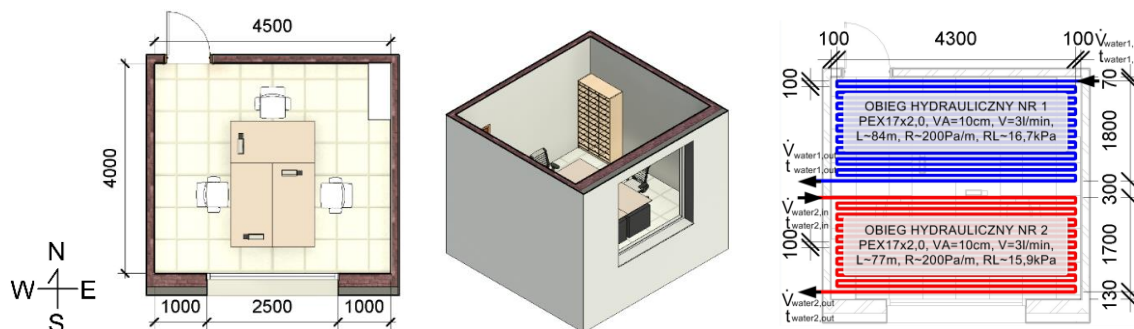
- w przypadku dynamicznego oddziaływania podłogi chłodzącej (przykładowe błędy):
  - dla temperatury powietrza w pomieszczeniu  $\Delta t_{air,mean}=0,15^{\circ}C$ ,  $\Delta t_{air,max}=0,22^{\circ}C$ ,
  - dla temperatury operacyjnej  $\Delta t_{op,mean}=0,04^{\circ}C$ ,  $\Delta t_{op,max}=0,41^{\circ}C$ ,
  - dla średniej temperatury powierzchni podłogi  $\Delta t_{IR.L2,mean}=0,16^{\circ}C$ ,  $\Delta t_{IR.L2,max}=0,32^{\circ}C$ ,
  - dla mocy chłodniczej instalacji hydraulicznej  $\delta Q_{c,mean} = 14,0\%$ ,
- w przypadku dynamicznego oddziaływania promieniowania słonecznego (przykładowe błędy):
  - dla temperatury powietrza w pomieszczeniu  $\Delta t_{air,mean}=0,23^{\circ}C$ ,  $\Delta t_{air,max}=0,49^{\circ}C$ ,
  - dla średniej temperatury powierzchni podłogi  $\Delta t_{IR.L1.2,mean}=0,08^{\circ}C$ ,  $\Delta t_{IR.L1.2,max}=0,31^{\circ}C$ .



## 4. Badania symulacyjne

### 4.1. Skrócony opis badań

Badania symulacyjne dynamicznych oddziaływań radiacyjnych podłóg chłodzących przeprowadzono dla przykładowego, pojedynczego pomieszczenia o charakterze biurowym, zlokalizowanego w budynku w mieście Poznań, w terenie miejskim, z jedną ścianą zewnętrzną z oknem. Pozostałe ściany oraz podłoga i strop pomieszczenia są przegrodami wewnętrznymi. W pomieszczeniu wymodelowano system radiacyjnej podłogi chłodzącej z dwoma obiegami hydraulicznymi w układzie meander, z których jeden jest rozprowadzony w strefie oddziaływania bezpośredniego promieniowania słonecznego.



Rys 17: Widoki modelowanego pomieszczenia i układu hydraulicznego podłogi chłodzącej.

Badania symulacyjne przeprowadzono zarówno dla pomieszczenia pustego, jak i wyposażonego w podstawowe meble biurowe. Podstawowy model numeryczny pomieszczenia obejmuje odpowiednio:

- sufit: 432 węzły przestrzenne, w tym  $2 \times 72 = 144$  węzły powierzchniowe
- ściana przednia (z oknem): 270 węzłów przestrzennych, w tym  $2 \times 54 = 108$  węzłów powierzchniowych,
- okno: 2 węzły przestrzenne, w tym  $2 \times 1 = 2$  węzłów powierzchniowych,
- ściana tylna: 324 węzły przestrzenne, w tym  $2 \times 54 = 108$  węzłów powierzchniowych,
- ściana lewa: 288 węzły przestrzenne, w tym  $2 \times 48 = 96$  węzłów powierzchniowych,
- ściana prawa: 288 węzły przestrzenne, w tym  $2 \times 48 = 96$  węzłów powierzchniowych,
- podłoga: 315.000 węzłów przestrzennych, w tym  $2 \times 1.800 = 3.600$  węzłów powierzchniowych.

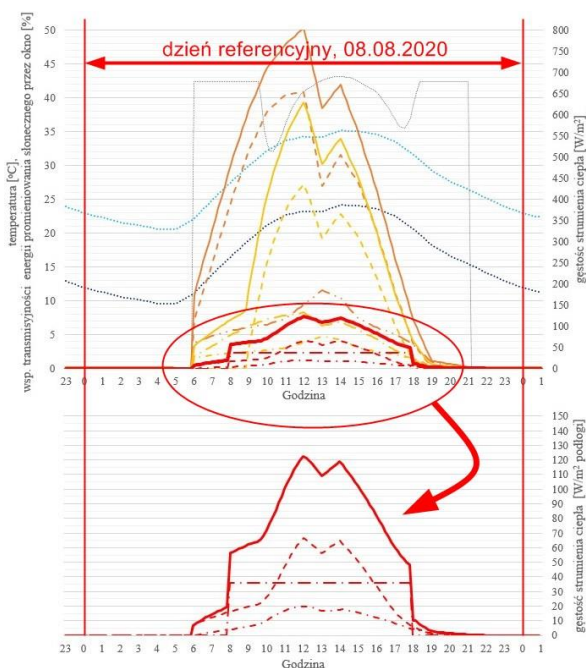
Model numeryczny systemu hydraulicznego z dwoma obiegami obejmuje  $4.433 + 4.103 = 8.536$  węzłów obliczeniowych. Razem model numeryczny obejmuje ponad 325.000 węzłów obliczeniowych, dla których przeprowadzono obliczenia symulacyjne z krokiem czasowym  $\Delta\tau_{ts} = 5s$ .

Model numeryczny obejmuje dyskretyzację przegród budowlanych w kierunku równoległym do ich powierzchni z krokiem przestrzennym równym:

- dla przegród niechłodzonych (sufit, ściany)  $\Delta x = 500mm$ ,
- dla podłogi chłodzącej  $\Delta x_{c,i} = 100mm$  (węzły obliczeniowe powierzchni realizującej radiacyjną i konwekcyjną wymianę ciepła) i  $\Delta x_c = 20mm$  (węzły obliczeniowe realizujące wymianę ciepła na drodze przewodzenia).

Wykorzystując zwalidowany autorski model numeryczny, przeprowadzono badania symulacyjne pozwalające na wyznaczenie przykładowych charakterystyk użytkowych systemów radiacyjnych podłóg chłodzących, uzyskiwanych w warunkach:

- teoretycznych, ustalonej wymiany ciepła w odizolowanym od otoczenia pomieszczeniu
  - symulacje prowadzono dla wewnętrznych zysków ciepła różnego rodzaju (radiacyjne, konwekcyjne, od promieniowania słonecznego padającego na posadzkę),
  - badano w szczególności maksymalną, teoretyczną moc chłodniczą możliwą do uzyskania przy spełnieniu warunków komfortu cieplnego definiowanego wg modelu stacjonarnego,
- praktycznych, dynamicznej wymiany ciepła w przykładowym pomieszczeniu
  - symulacje prowadzono z rzeczywistymi, zmierzonymi przez stację meteorologiczną Politechniki Pozańskiej parametrami środowiska zewnętrznego dla wybranego, referencyjnego dnia letniego i wybranego dobowego profilu użytkowania pomieszczenia (3 osoby, praca biurowa z komputerami). Symulacje prowadzono dla następujących po sobie w cyklu dobowym identycznych dni obliczeniowych i profili użytkowania,
  - badaniom poddano następujące czynniki wpływające na charakterystyki użytkowe systemów radiacyjnych podłóg chłodzących:
    - parametry konstrukcyjne podłogi (grubość jastrychu, wykończenie posadzki),
    - parametry operacyjne systemu hydraulicznego (temperatura zasilania, natężenie przepływu),
    - strategia sterowania (on-off, płynna regulacja temperatury zasilania) i harmonogram pracy systemu (zezwolenie na pracę 24h/doba, ograniczenie dobowego czasu pracy),
    - wyposażenie pomieszczenia (puste, umeblowane),
    - współpraca z systemem wentylacyjnym (częściowe chłodzenie wentylacją lub jego brak).



**Rys 18:** Dobowa zmienność parametrów środowiska zewnętrznego oraz zewnętrznych i wewnętrznych zysków ciepła powstających w pomieszczeniu. Czas lokalny (letni).

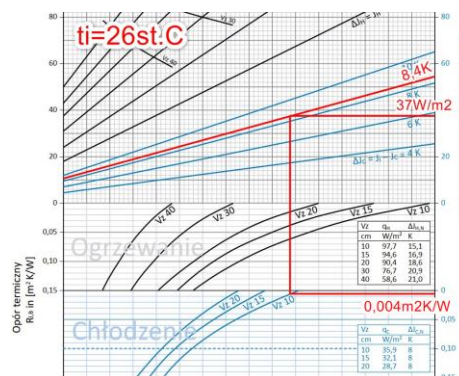
Badano wpływ powyższych czynników na charakterystyki użytkowe systemu radiacyjnej podłogi chłodzącej, wyrażane w szczególności jako (parametry reprezentujące charakterystyki użytkowe systemu):

- jednostkowa moc chłodnicza, rozumiana jako gęstość strumienia ciepła wymienianego przez powierzchnię podłogi z pomieszczeniem,  $q_{floor}$  (mierzona po stronie powierzchni) oraz jako strumień ciepła wymieniany przez czynnik obiegowy w rurkach hydraulicznych,  $q_{water}$  (mierzona po stronie czynnika obiegowego),
- temperatura powietrza  $t_{i,air}$  i temperatura operacyjna  $t_{i,op}$  w pomieszczeniu,
- rozkład temperatury powierzchni posadzki:
  - lokalne ekstrema,  $t_{c,min}$  i  $t_{c,max}$

- o średnia dla całej podłogi  $t_{c,mean}$ ,
- bilans energetyczny systemu hydraulicznego,  $E_{water,day}$  i powietrznego,  $E_{vent,day}$  w cyklu dobowym.

Uzyskane wyniki odniesiono do referencyjnych, teoretycznych charakterystyk określonych w znormalizowany, uproszczony sposób zgodnie z instrukcjami technicznymi i materiałami projektowymi jednego z producentów rozwiązań tego typu systemów.

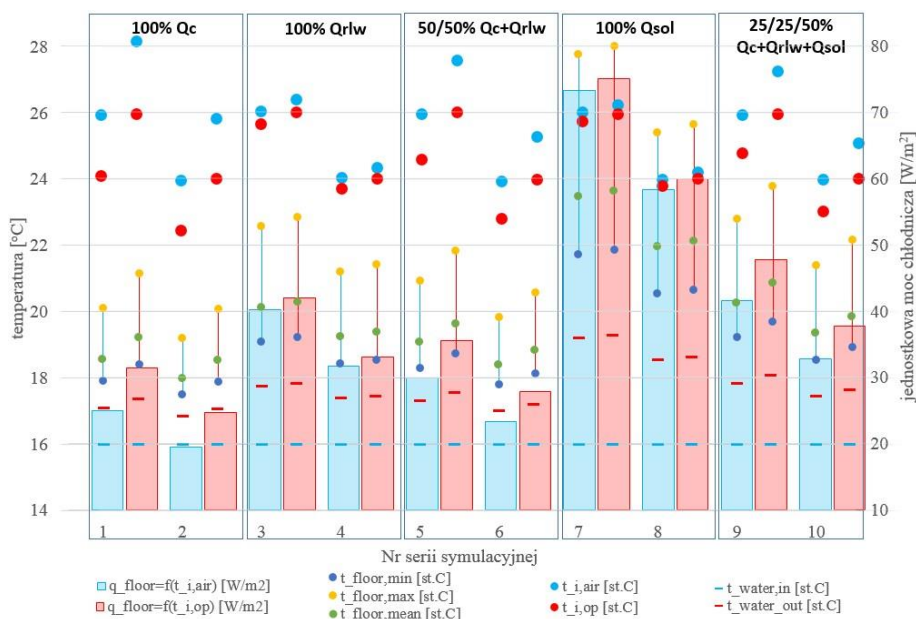
Wykonano 20 serii symulacyjnych w warunkach ustalonej wymiany ciepła (odpowiadających teoretycznym charakterystykom użytkowym) oraz 16 serii symulacyjnych w warunkach nieustalonej wymiany ciepła (odpowiadających rzeczywistym charakterystykom użytkowym). Wyniki poszczególnych serii symulacyjnych przedstawiono w formie tabel i wykresów, reprezentujących chwilowy lub dobowy przebieg zmienności parametrów reprezentujących charakterystyki użytkowe systemów radiacyjnych podłóg chłodzących oraz dobowe wartości średnie, mediany i ekstrema.



**Rys 19:** Referencyjna jednostkowa moc chłodnicza podłogi, określona metodą znormalizowaną wg materiałów projektowych firmy Uponor.

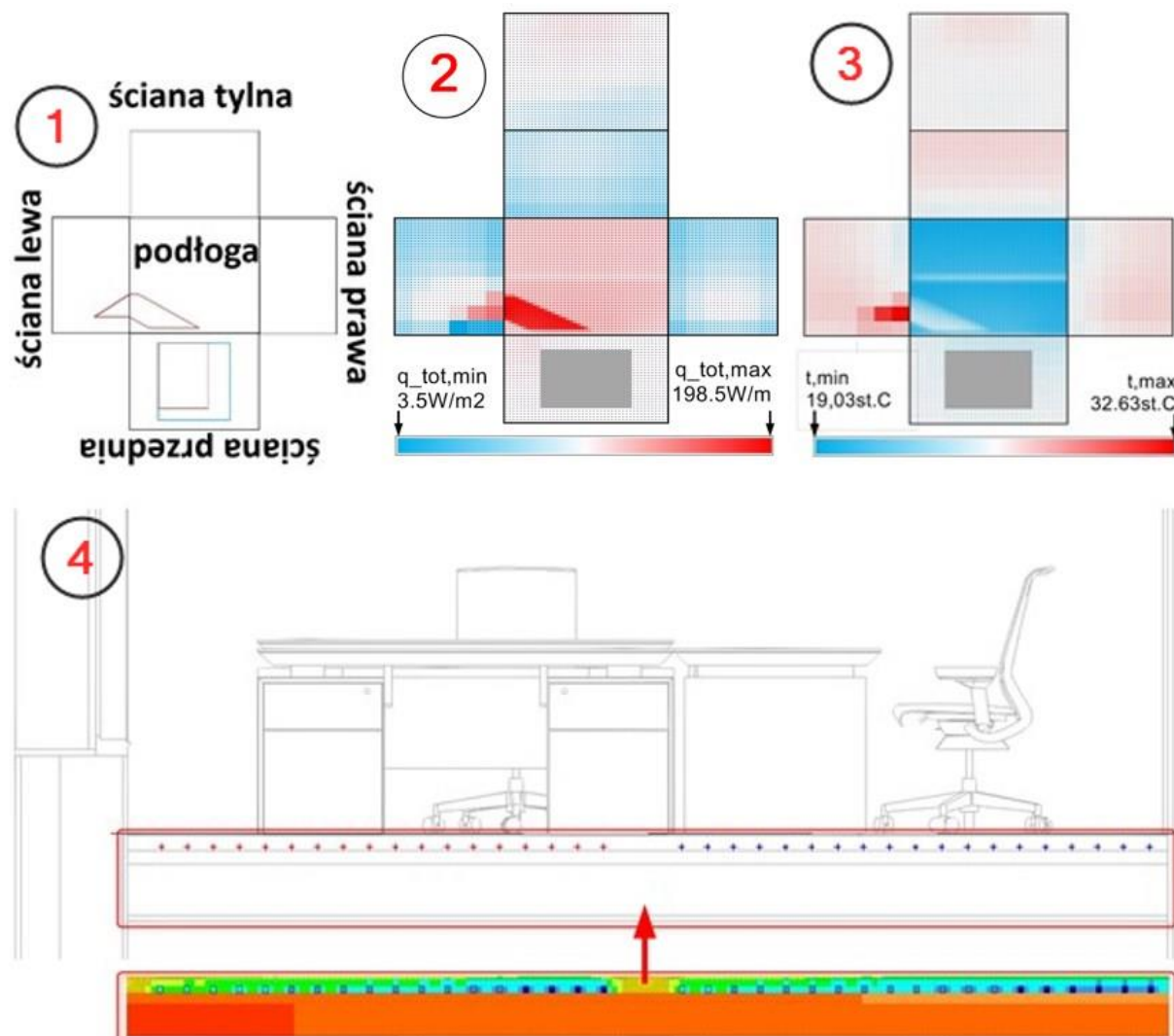
## 4.2. Przykładowe wyniki

Przykładowe wyniki symulacji w warunkach ustalonych, prezentujące ustabilizowane wartości parametrów determinujących teoretyczną możliwą do osiągnięcia moc chłodniczą systemu i wartości związanych z nią parametrów operacyjnych (temperatura zasilania i powrotu obiegu hydraulicznego  $t_{water,in}$ ,  $t_{water,out}$  oraz komfortu (temperatura posadzki odpowiednio minimalna  $t_{floor,min}$ , maksymalna  $t_{floor,max}$ , średnia  $t_{floor,mean}$ , temperatura w pomieszczeniu odpowiednio powietrza  $t_{i,air}$ , operacyjna  $t_{i,op}$ ), osiągane w różnych warunkach pracy (wewnętrzne zyski ciepła konwekcyjne  $Q_c$  lub radiacyjne  $Q_{rlw}$ , zewnętrzne-słoneczne  $Q_{sol}$ , temperatura powietrza  $t_{i,air}$  lub operacyjna  $t_{i,op}$  jako kryterium komfortu) pokazano na poniższym rysunku.



**Rys 20:** Teoretyczna moc chłodnicza i referencyjne wartości temperatury w pomieszczeniu z podłogą chłodzącą w zależności od rodzaju zysków ciepła. Legenda oznaczeń w tekście.

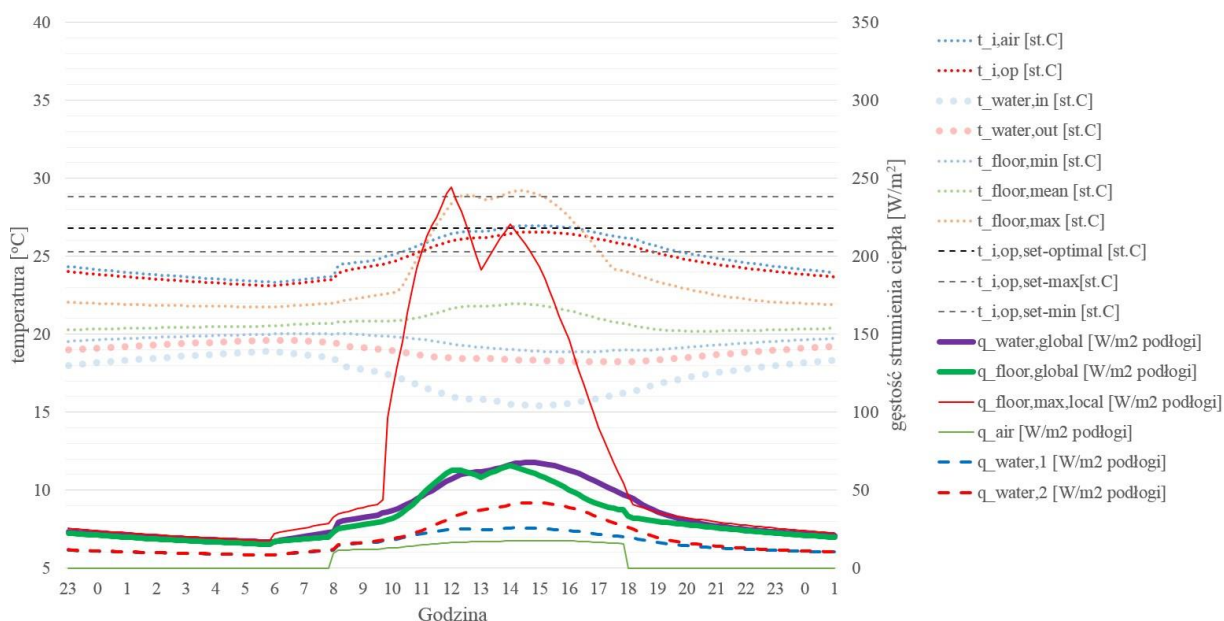
Przykładowe cząstkowe wyniki symulacji w warunkach nieustalonych, obejmujące chwilowy stan cieplny pomieszczenia pokazano na poniższym rysunku:



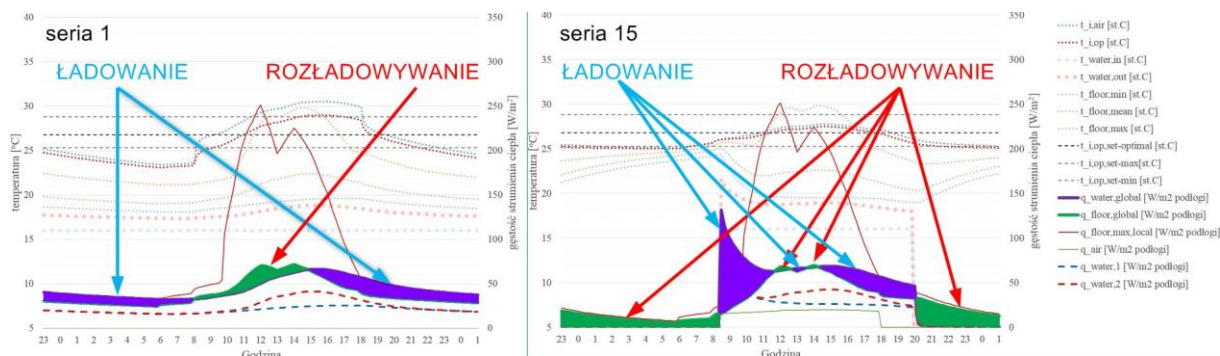
**Rys 21:** Przykładowe wyniki symulacji: chwilowy stan cieplny pomieszczenia: powierzchnie przegród wewnętrznych oświetlone bezpośrednim promieniowaniem słonecznym (1), gęstości strumienia ciepła wymianianego przez powierzchnie,  $q_{tot,min}/q_{tot,max}$  (2), rozkład temperatury powierzchni,  $t_{min}/t_{max}$  (3), pole temperatury w wybranym przekroju podłogi (4).



Przykładowe wyniki symulacji w warunkach nieustalonych, obejmujące dobowy przebieg zmienności parametrów determinujących rzeczywistą charakterystykę użytkową radiacyjnej podłogi chłodzącej w różnych warunkach pracy i z uwzględnieniem wpływu czynników dynamizujących wymianę ciepła w pomieszczeniu (w szczególności różnego w czasie zasięgu promieniowania słonecznego w pomieszczeniu i jego zmiennej mocy grzewczej) pokazano na poniższych rysunkach, na których zaprezentowano (poza opisanymi wyżej parametrami charakterystycznymi także dla wyników symulacji w warunkach statycznych) zakres komfortowej temperatury operatywnej wyrażonej wg modelu adaptacyjnego komfortu cieplnego  $t_{i,op,set-min}$ ,  $t_{i,op,set-max}$ ,  $t_{i,op,set-optimal}$  oraz moc chłodniczą czynnika obiegowego  $q_{water}$  i moc chłodniczą powierzchni podłogi: średnią  $q_{floor,global}$  i maksymalną występującą lokalnie  $q_{floor,max,local}$ , a także udział układu wentylacyjnego jako wspomagającego chłodzenie pomieszczenia z mocą chłodniczą  $q_{air}$ .



**Rys 21:** Przykładowe wyniki symulacji: charakterystyka użytkowa radiacyjnej podłogi chłodzącej w warunkach dynamicznej wymiany ciepła w przypadku temperatury operacyjnej stabilizowanej w zakresie 23-26°C przez 24h/dobę, z podłogą chłodzącą sterowaną wg strategii jakościowej, z płynną regulacją temperatury zasilania układu hydraulicznego, w pustym pomieszczeniu z płytkami ceramicznymi na podłożu. Wyjaśnienie oznaczeń z legendy w tekście.



**Rys 22:** Przykładowe porównanie faz ładowania i rozładowywania systemu radiacyjnej podłogi chłodzącej w zależności od wybranej strategii sterowania (po lewej – zezwolenie na pracę 24h/dobę i brak chłodzenia wentylacją, po prawej – zezwolenie na pracę w godzinach 5:00 – 20:00 i wspomaganie chłodzenia wentylacją). Wyjaśnienie oznaczeń z legendy w tekście.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone analizy nie wyczerpują problemu wpływu dynamicznych oddziaływań na charakterystyki użytkowe radiacyjnych podłóg chłodzących dla różnych kategorii pomieszczeń i różnych warunków ich eksploatacji, jednak na podstawie badań zrealizowanych dla przykładowego rodzaju pomieszczenia (biurowe), poddanego specyficznym warunkom użytkowania (brak w oknach urządzeń zacieniających), eksponowanego na znaczne w polskich warunkach klimatycznych zewnętrzne zyski ciepła od promieniowania słonecznego, stwierdzono:

- w pomieszczeniach typu biurowego z mieszanymi (konwekcyjno-radiacyjnymi) zyskami ciepła, systemy podłóg chłodzących pozwalają skutecznie stabilizować temperaturę powietrza i operacyjną w granicach komfortu cieplnego pod warunkiem współpracy z systemami wentylacyjnymi (pełniącymi, poza osuszaniem, rolę częściowego pokrywania obciążeń chłodniczych - konwekcyjnych zysków ciepła),
- zmienność jakościowa i ilościowa zysków ciepła w pomieszczeniu, w szczególności od promieniowania słonecznego, a także strategia sterowania systemem mają istotny wpływ na charakterystyki użytkowe podłóg chłodzących w rzeczywistych warunkach eksploatacji – są czynnikami najbardziej dynamizującymi przepływ ciepła w pomieszczeniu,
- parametry konstrukcyjne, operacyjne i strategia sterowania systemem radiacyjnej podłogi chłodzącej powinny być analizowane łącznie ze względu na zachodzące pomiędzy nimi zależności, wpływające na działanie całego systemu,
- strategia sterowania systemem wpływa znacząco na jego charakterystykę użytkową, a wykorzystanie akumulacyjnych właściwości systemu w powiązaniu z harmonogramem użytkowania chłodzonego pomieszczenia pozwala zwiększyć jego skuteczność i poprawić komfort cieplny,
- regulacja przepływu (ilościowa) ma mniejszy wpływ na działanie systemu w warunkach dynamicznego przepływu ciepła niż regulacja temperatury zasilania obiegów hydraulicznych (jakościowa),
- występowanie w pomieszczeniu mebli ograniczających wymianę ciepła powierzchni podłogi z pomieszczeniem jest czynnikiem ograniczającym jej potencjał chłodniczy ze względu na znacznie obniżoną temperaturę powierzchni podłogi pod meblami i ryzyko kondensacji pary wodnej,
- utrzymanie temperatury powierzchni posadzki na odpowiednio wysokim poziomie jest czynnikiem ograniczającym możliwą do osiągnięcia moc chłodniczą, a niska temperatura powierzchni posadzki występująca globalnie w pomieszczeniu lub lokalnie jedynie w niektórych w jego strefach, a także niejednorodność pola temperatury na tej powierzchni może powodować dyskomfort cieplny.

Uzyskane wyniki badań podkreślają znaczący wpływ czynników dynamizujących oddziaływania cieplne radiacyjnych podłóg chłodzących na ich charakterystyki użytkowe. Sformułowane wnioski pozwoliły na **udowodnienie postawionych tez**.

Sprecyzowano następujące **rekomendacje, wytyczne projektowe i eksploatacyjne dla systemów radiacyjnych podłóg chłodzących:**

- w przypadku stosowania radiacyjnych podłóg chłodzących współpracujących z systemami wentylacyjnymi, w algorytmie sterowania systemu wentylacyjnego należy uwzględnić jego udział w chłodzeniu pomieszczenia. Moc chłodnicza systemu wentylacyjnego może być regulowana za pomocą temperatury nawiewu (jakościowo) i wydajności systemu (ilościowo), co należy uwzględnić w strategii sterowania systemem wentylacyjnym w kontekście jego typu (sposobu dystrybucji powietrza w pomieszczeniu i rozkładu temperatury powietrza w wentylowanym pomieszczeniu). W sytuacjach, w których pokrycie szczytowych obciążeń chłodniczych nieodprowadzanych przez system radiacyjnej podłogi chłodzącej wymaga większego strumienia powietrza nawiewanego niż wynikający z kryterium higienicznego, możliwe jest wprowadzenie częściowej i zmiennej w czasie recyrkulacji powietrza – gdy jest to dopuszczalne ze względu na klasę higieniczności pomieszczenia,
- ze względu na akumulacyjny charakter systemów radiacyjnych podłóg chłodzących, zaleca się definiowanie zakresu temperatury regulowanej pozwalającego spełnić wymagania komfortu cieplnego przy jednoczesnym umożliwieniu pracy systemu w trybach ładowania i rozładowywania w warunkach zmiennego ze względu na gęstość i lokalizację strumienia zysków ciepła w pomieszczeniach. Odpowiednio szeroki zakres temperatury regulowanej (różnica pomiędzy dopuszczalną maksymalną i minimalną temperaturą w pomieszczeniu) zwiększa stabilność pracy systemu w warunkach dynamicznej wymiany ciepła, zmniejszając dobową liczbę załączeń i skokowych zmian mocy układu hydraulicznego i obciążenia źródła chłodu,
- stosowanie algorytmów sterowania uwzględniających dobowy harmonogram pracy pozwala na ograniczenie czasu działania układu hydraulicznego w okresach, w których pomieszczenie jest nieużytkowane. Umożliwia to kontrolę zużycia energii chłodniczej (źródło chłodu) i elektrycznej (pompy obiegowe) przez system w cyklu dobowym, przy zachowaniu możliwości swobodnego (bez przepływu w układzie hydraulicznym) rozładowywania się systemu poza okresami jego aktywnej pracy. Relatywnie niewielka pojemność cieplna standardowych systemów radiacyjnych podłóg chłodzących powoduje, że po fazie nocnego rozładowywania systemu ze zdezaktywowanym przepływem w obiegu hydraulicznym, ponowna akumulacja chłodu może być zrealizowana przez kilka godzin bezpośrednio przed okresem użytkowania pomieszczenia, bez konieczności aktywnej pracy systemu 24h/dobę,
- stosowanie regulacji jakościowej z temperaturą zasilania obiegu hydraulicznego jako wielkością nastawiającą w funkcji temperatury operacyjnej jako parametru regulowanego jest skuteczną metodą zwiększenia reaktywności systemu na zmienne obciążenie chłodnicze,
- kontrola temperatury powierzchni posadzki, kluczowa ze względu na zabezpieczenie przed kondensacją pary wodnej i komfort cieplny jest utrudniona w warunkach dynamicznego oddziaływania promieniowania słonecznego ze względu na silną zależność tej temperatury od zmiennych w czasie i przestrzeni słonecznych zysków ciepła, a także od ustawionego na posadzce wyposażenia pomieszczenia (mebli). Rekomenduje się lokalizowanie referencyjnych punktów pomiarowych temperatury powierzchni posadzki w pobliżu początków obiegów hydraulicznych i w obszarach minimalnego oddziaływania promieniowania słonecznego oraz, ze względu na znaczący wpływ mebli na lokalne obniżenie temperatury posadzki, także pod meblami,
- wykorzystanie metod symulacyjnych na etapie projektowania systemów radiacyjnych podłóg chłodzących pozwala prawidłowo ocenić ich charakterystyki użytkowe w konkretnych aplikacjach, dając możliwość racjonalnego wymiarowania złożonych systemów HVAC i źródeł chłodu.

**Oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego** zaprezentowanym w pracy jest opracowany i walidowany autorski model numeryczny, umożliwiający przeprowadzanie analiz dynamicznego przepływu ciepła w pomieszczeniu z radiacyjną podłogą chłodzącą, ze szczególnym uwzględnieniem niejednorodnych jakościowo i ilościowo zysków ciepła generowanych w pomieszczeniu w sposób odpowiadający realnym aplikacjom.

**Do oryginalnych osiągnięć pracy** można zaliczyć zbadanie charakterystyk użytkowych radiacyjnej podłogi chłodzącej w warunkach eksploatacyjnych zbliżonych do występujących w rzeczywistych pomieszczeniach biurowych, w tym w szczególności:

- ocenę wpływu oddziaływania różnych zysków ciepła na charakterystykę użytkową radiacyjnej podłogi chłodzącej,
- analizę dynamiki przepływu ciepła w podłodze chłodzącej i jej reaktywności na zmieniające się zyski ciepła i stan cieplny pomieszczenia,
- określenie wpływu parametrów konstrukcyjnych i operacyjnych systemu radiacyjnej podłogi oraz zmian w aranżacji pomieszczenia na właściwości użytkowe systemu,
- przedstawienie wytycznych i rekomendacji projektowych i eksploatacyjnych dla tego typu systemów.

Sprecyzowano następujące problemy naukowe związane z tematyką dysertacji i wyznaczające dalsze **planowane kierunki dalszych badań** z wykorzystaniem opracowanego modelu symulacyjnego:

- zbadanie wpływu innych parametrów systemów radiacyjnych podłóg chłodzących na ich charakterystyki użytkowe, w tym w szczególności parametrów konstrukcyjnych niemożliwych do zmiany eksploatacyjnej:
  - grubość warstwy termoizolacyjnej pod rurkami,
  - głębokość zatopienia rurek w jastrychu,
  - rodzaj i średnica rurek,
  - sposób układania rurek w jastrychu (np. ślimak, podwójny meander),
  - rozstaw rurek,
- zbadanie charakterystyk użytkowych radiacyjnych podłóg chłodzących dla innych przypadków ich zastosowania, w tym w szczególności:
  - innych kategorii pomieszczeń ze zróżnicowanym rozkładem jakościowym i ilościowym zysków ciepła (np. mocno przeszklone pomieszczenia typu komunikacyjnego – hole w budynkach biurowych, hale lotnisk, budynki wystawowe, itd.),
  - innych warunków pracy, związanych np. z orientacją budynku względem kierunków świata i charakterystyką przegród przezroczystych (wpływającą znacząco na zyski ciepła od promieniowania słonecznego), zróżnicowanymi obiektami w otoczeniu, takimi jak grunt i sąsiadujące budynki, (przesłaniającymi przed bezpośrednim oddziaływaniem promieniowania słonecznego, ale także wpływającymi na temperaturę i charakterystykę radiacyjną obiektów w otoczeniu),
- analizy możliwości polepszenia charakterystyk użytkowych przez zabiegi projektowe, np. dostosowanie przebiegu pętli hydraulicznych w pomieszczeniu do dobowego rozkładu przestrzennego zysków ciepła od bezpośredniego promieniowania słonecznego i indywidualne sterowanie obiegami (np. indywidualna regulacja temperatury zasilania lub natężenia przepływu



w poszczególnych obiegach w zależności od radiacyjnych zysków ciepła od promieniowania słonecznego w objętej nimi strefie),

- analiza lokalnych warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniu z uwzględnieniem radiacyjnego oddziaływania niejednorodnych cieplnie przegród w pomieszczeniu i zmiennego w czasie i przestrzeni promieniowania słonecznego, w tym wpływ lokalizacji czujnika temperatury promieniowania na sterowanie systemem radiacyjnej podłogi chłodzącej z temperaturą operacyjną jako parametrem regulowanym,
- rozbudowa modelu numerycznego o dokładniejszy moduł obliczeniowy umeblowania pomieszczenia, umożliwiającą uwzględnienie pojemności cieplnej mebli, ich lokalizacji w przestrzeni trójwymiarowej i wymiany ciepła mebli na drodze konwekcji i promieniowania – co pozwoli lepiej badać wpływ umeblowania na niejednorodność środowiska cieplnego pomieszczenia,
- opracowanie i analiza algorytmu sterowania z nastawą wielkości regulowanej (np. temperatury operacyjnej w pomieszczeniu) ustalaną dla każdego dnia w oparciu o model adaptacyjny komfortu cieplnego i dostosowywanymi do niej parametrami nastawiającymi systemu radiacyjnej podłogi chłodzącej (temperatura zasilania, przepływ, dobowy harmonogram pracy) oraz analiza sterowania predykcyjnego pracą podłogi chłodzącej,
- rozszerzenie analiz cieplnych do cieplno-wilgotnościowych, uwzględniających zmienne zapotrzebowanie na energię na cele osuszania powietrza,
- wprowadzenie do modelu obliczeniowego funkcjonalności chłodzenia nocnego i jego ocena ze względów na potencjał chłodniczy i ryzyko kondensacji pary wodnej na powierzchni podłogi poza okresami użytkowania pomieszczenia,
- analiza złożonych systemów HVAC z podłogami chłodzącymi, układami wentylacyjnymi i źródłami chłodu ze względu na energochłonność procesów osuszania i chłodzenia celem optymalizacji zużycia energii z uwzględnieniem dobowych i sezonowych cykli pracy.